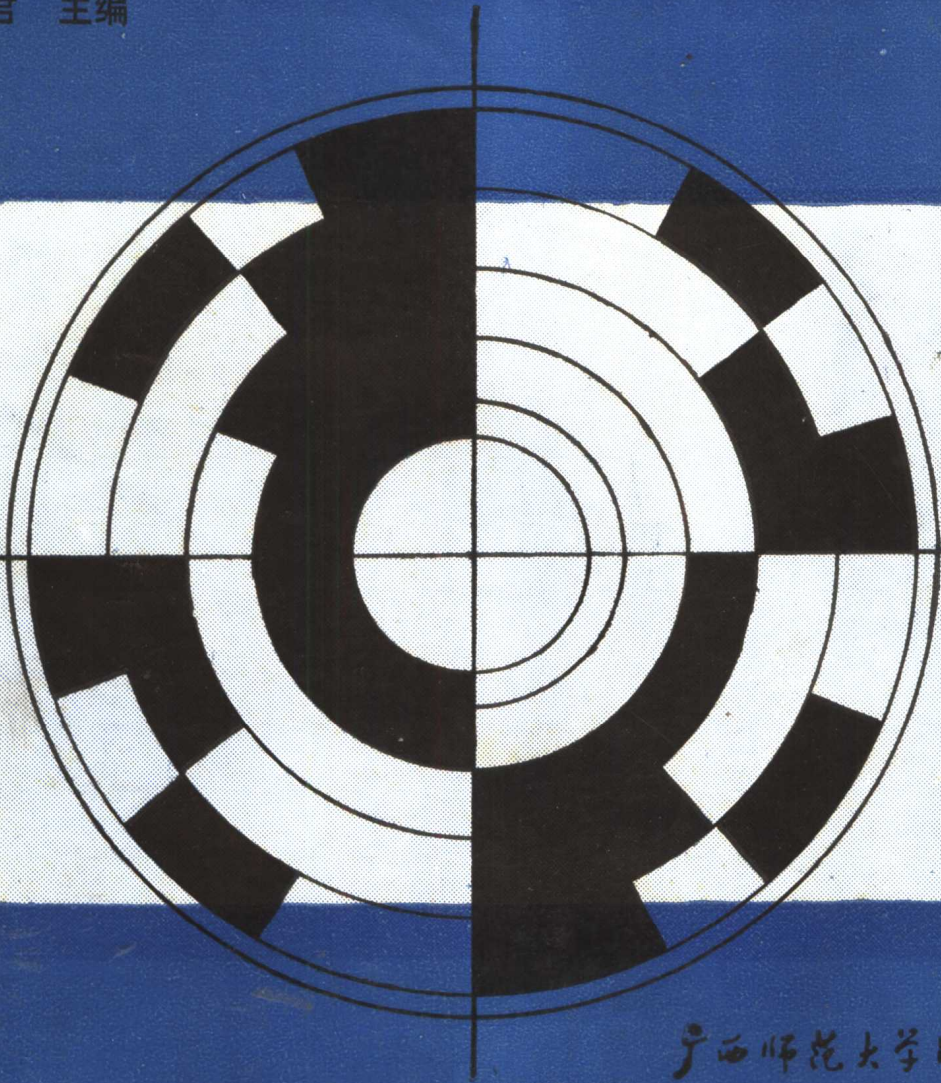


自动控制技术

牟孝君 主编



广西师范大学出版社

高等学校试用教材

自动控制技术

牟孝君

主编

刘延申 张宗根

袁声恩 徐震东

编

广西师范大学出版社

内 容 提 要

本书系统而简明地介绍了伺服电机、测速发电机、自整角机、旋转变压器、步进电机、磁滞电动机和晶闸管等控制元件的原理和应用,并介绍了晶闸管变流技术、顺序控制器、数控技术等常见控制系统的理论基础和实际应用。本书可作为师范院校物理系和理工科院校有关专业的试用教材,也可供有关技术人员进修和参考之用。

高等学校试用教材
自动控制技术
徐寿君主编

广西师范大学出版社出版
(广西桂林育才路3号)
广西新华书店发行
广西临桂县印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16印张12.5字数304千字
1989年7月第1版 1989年7月第1次印刷
印数: 0001—3000

ISBN7—5633—0166—6/O·003

定价: 4.70元

前 言

随着教育事业的发展，理科学生也需要学习一些应用技术。本书是为物理学和电子学等专业开设有关课程而编写的试用教材，也可供其他有关专业和工程技术人员参考。

本书内容包括控制电机、晶闸管交流技术、数字逻辑基础、顺序控制和数字控制等。全书各章之间既相互联系，又相对独立自成系统，可以根据教学的需要全部讲授或选讲部分内容。在编写中，着重于基本概念和基本规律的阐述，力求作到精选内容、深入浅出，利于教学。每章之后都有思考题和习题。

本书由广西师范大学牟孝君教授担任主编，参加编写的有牟孝君（第一章）、华中师范大学刘延申（第二章）、安徽教育学院张宗根（第三章）、湖南师范大学袁声恩（第四章）和苏州大学徐震东（第五章）等。本书初稿经华中师大杨约翰教授和何建民副教授审阅。在本书编写和出版过程中，得到了编者所在校、系和广西师范大学出版社的帮助和支持，为此，我们表示衷心的感谢。

由于我们经验不足，学识有限，缺点和错误在所难免，希望使用本教材的师生和其他读者提出批评和改进意见。

编 者

1988年12月

目 录

第一章 控制电机	(1)
§ 1-1 伺服电动机	(1)
§ 1-2 测速发电机	(12)
§ 1-3 自整角机	(16)
§ 1-4 旋转变压器	(22)
§ 1-5 步进电动机	(28)
§ 1-6 磁滞电动机	(39)
思考题和习题一	(42)
第二章 晶闸管变流技术	(43)
§ 2-1 晶闸管	(43)
§ 2-2 可控整流电路	(49)
§ 2-3 有源逆变电路	(63)
§ 2-4 交流调压器	(67)
§ 2-5 晶闸管的触发电路	(69)
§ 2-6 应用实例	(78)
思考题和习题二	(81)
第三章 数字逻辑基础	(82)
§ 3-1 逻辑代数基础	(82)
§ 3-2 数字电路和逻辑设计	(88)
§ 3-3 常用时序逻辑电路——触发器	(103)
§ 3-4 基本逻辑部件	(114)
思考题和习题三	(133)
第四章 顺序控制器	(135)
§ 4-1 逻辑组合式顺序控制器	(135)
§ 4-2 步进式顺序控制器	(142)
§ 4-3 SK ₂ -B型步进式顺序控制器	(145)
思考题和习题四	(153)
第五章 数控技术	(154)
§ 5-1 概述	(154)
§ 5-2 点位、直线控制系统的控制装置	(156)
§ 5-3 逐点比较法插补运算原理	(162)
§ 5-4 直线、圆弧插补控制机的基本结构	(169)
思考题和习题五	(195)

第一章 控制电机

控制电机，是指在自动控制系统和解算装置中用作检测、放大、执行和解算的电机。

从基本原理来看，控制电机和普通电机基本相同。但由于它们所起的作用不同，因而性能有很大的区别。对普通电机，主要要求它们起动和运转的力能指标要高；而对控制电机则主要要求它们可靠性、精度和灵敏度要高。

控制电机的种类繁多，常用的有伺服电动机，测速发电机，旋转变压器，自整角机和步进电动机等。

控制电机的外径一般是12.7~130毫米，输出功率一般是几十毫瓦到几百瓦。但在大功率控制系统中，输出功率可达几十千瓦、重量达几百公斤，而电子手表中所用的一种步进电机，外径只有6毫米，耗电不到一微瓦，重量只有十多克。

控制电机在工业自动化系统、科学研究和国防等领域都有非常广泛的用途。下面以火炮自动定位系统为例说明几种控制电机的用途。

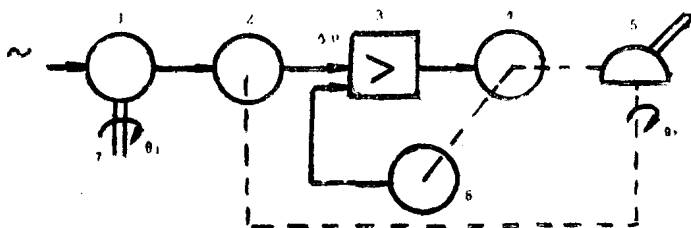


图1-0-1 火炮控制系统示意图

图1-0-1 是火炮控制系统示意图。图中1为自整角发送机，2为自整角变压器，3为放大器，4为伺服电动机，5为火炮（控制对象），6为测速发电机，7为手轮。系统的任务是要保证火炮的转角 θ_2 与手轮的转角 θ_1 相等。若 $\theta_2 \neq \theta_1$ ，自整角发送机和自整角变压器转角不等，自整角变压器的输出信号电压 Δu 与 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 成比例， Δu 经放大器放大后控制伺服电动机转动，从而火炮也被带动转动，转动的方向是使 $\theta_2 - \theta_1$ 减小。当 $\theta_2 = \theta_1$ 时， $\Delta\theta = 0$ ， $\Delta u = 0$ ，电机停转，火炮和手轮转过同样角度，测速发电机作为速度负反馈元件，可以减少在跟踪过程中可能出现的振荡现象。

从上例可见，自整角发送机和变压器组成检测装置，把手轮转角变成电压信号。测速发电机是把转速变为电压信号，是速度检测装置。它们都起转换信号的作用，所以统称信号元件。属于信号元件的还有旋转变压器等。放大器和伺服电动机组成执行机构，它们受到信号的控制，是执行元件，也称为功率元件。它们是把信号转换成输出功率或把电能转换成机械能。属于功率元件的还有步进电动机等。磁滞电动机在恒速系统中也是作为执行元件。

§ 1-1 伺服电动机

伺服电动机又叫执行电动机，在自动控制系统中用作执行元件，即把输入的电信号转换

成轴的旋转运动。

对伺服电动机的要求和驱动用的电机不同。对驱动电机的要求主要是运转平衡，负载变化时转速变化要小，效率高。对伺服电动机，则要求它：①快速响应。即动作要敏捷，得到信号能快速起动，去掉信号后立即停转，这就要求电机的机电时间常数小。②可控性好。即不加控制信号电机不转（无自转）；当控制信号极性改变时，转向也随之很快改变。③运行稳定。即要求机械特性和调节特性均为线性，并且在控制信号变化时，伺服电动机的转速能在宽广的范围内连续调节，保持稳定运行。

按电流种类，伺服电动机分为直流和交流两种。直流伺服电动机一般用于功率较大的控制系统中，其输出功率大约是1~600瓦，也有高达数千瓦的。交流伺服电动机一般用于小功率控制系统中，其输出功率大约是0.1~100瓦，而最常用的输出功率在30瓦以下。

一、直流伺服电动机

直流伺服电动机，其构造和普通小型直流电动机并无原则上的区别，但为了减小惯性，直流伺服电动机的转子一般做得细而长，气隙也比较小。直流伺服电动机的工作原理也和他励直流电动机相同，其原理如图1-1-1所示，其中 U_j 是励磁电压， I_j 是励磁电流， U_a 是电枢电压， E_a 是电枢反电势， I_a 是电枢电流， R_a 是电枢电阻。

和普通直流电动机一样，直流伺服电动机的电压平衡方程式为：

$$\begin{aligned} U_a &= E_a + I_a R_a \\ &= K_e n \phi + I_a R_a \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

式中， K_e 是常数， n 是转速， ϕ 是每极磁通。

$$M = K_m I_a \phi \quad (1-1-2)$$

式中 K_m 是常数。转速为

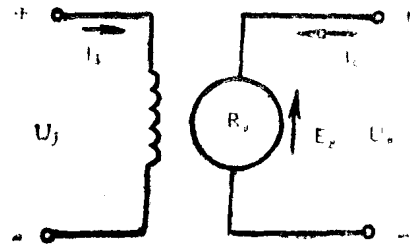


图1-1-1 直流伺服电动机原理图

$$n = \frac{U_a}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_m \phi^2} M \quad (1-1-3)$$

从(1-1-3)式可以看出，要改变转速 n 有两种方法：①改变电枢两端的电压 U_a ，这种方法叫电枢控制；②改变磁通 ϕ ，即改变励磁电压 U_j ，这种方法叫磁场控制。磁场控制所需要的控制功率较小，但其控制特性远远不如电枢控制，所以在控制系统中主要采用电枢控制。因此，下面我们主要分析电枢控制直流伺服电动机的特性。

1. 机械特性：在电枢电压 U_a 和磁通 ϕ （或励磁电压 U_j ）保持不变的情况， $n = f(M)$ 的关系叫伺服电动机的机械特性。

由式(1-1-3)可知，当电枢电压 U_a 和磁通 ϕ 不变时， n 和 M 是线性关系，即伺服电动机的机械特性是条直线。或(1-1-3)可以写作：

$$n = n_0 - K M \quad (1-1-4)$$

式中 $n_0 = \frac{U_a}{K_e \phi}$ 是直线在纵坐标上的截距， $K = \frac{R_a}{K_e K_m \phi^2}$ 是直线的斜率， K 前的负号说

明直线是下降的,如图1-1-2所示。图中 n_0 是 $M=0$ 时的转速,叫理想空载转速; M_d 是 $n=0$ 时的转矩叫堵转转矩,由式(1-1-4)可知, $M_d = n_0 / K = K_m \phi U_a R_a$ 。斜率 $K = \text{tg} \alpha$ 。

在电枢控制时, U_a 是变化的, n_0 和 M_d 都随 U_a 成正比变化,而 K 和 R_a 无关。因此,当 U_a 变化时,我们得到一组相互平行的机械特性曲线, U_a 越大,机械特性曲线位置越高,如图1-1-3所示。

2. 调节特性:在转矩 M 和磁通 ϕ (或励磁电压 U_f)保持不变的情况下, $n = f(U_a)$ 的关系叫伺服电动机的调节特性。

由式(1-1-3)可知,伺服电动机的调节特性也是一条直线,如图1-1-4所示。当 $n=0$ 时, $U_a = U_{a0} = R_a M / K_m \phi$; $U_a < U_{a0}$ 时,电动机不转。为什么 $U_a < U_{a0}$ 时电动机不转呢?这是因为 $U_a < U_{a0}$ 时,电机的电磁转矩小于阻转矩,所以电机转不起来。 U_a 增加时,电机的电磁转矩也增加,当 $U_a = U_{a0}$ 时,电磁转矩和阻转矩相等,只要 U_a 再稍为增加一点,电磁转矩就大于阻转矩,电动机就会转动起来。所以,我们把控制电压 U_a 从零到 U_{a0} 这一范围叫电动机的死区。显然,负载越大,死区也越大。调节特性的斜率 $K' = \text{tg} \alpha' = 1 / K_e \phi$,它与 M 和 U_a 无关,由电动机本身的参数决定。

当电动机负载转矩不同时, U_{a0} 不同,但调节特性的斜率 K' 不变,因而对应不同的阻转矩 M ,可以得到一组平行的调节特性曲线,如图1-1-5所示。

由上可见,直流伺服电动机在电枢控制时,具有线性的机械特性和调节特性,而且特性曲线组又是互相平行的。因而直流伺服电动机具有良好的控制性能,这是它的很可贵的优点。

它的缺点是:①结构较复杂,电刷和换

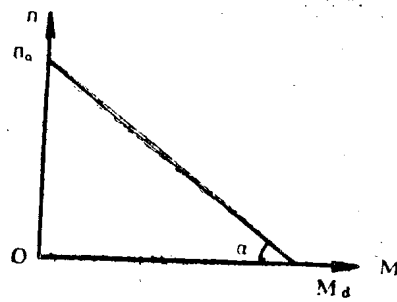


图1-1-2 直流伺服电动机的机械特性

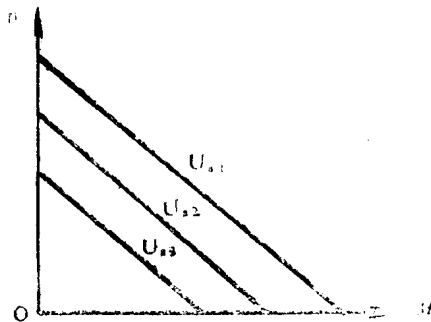


图1-1-3 机械特性曲线族

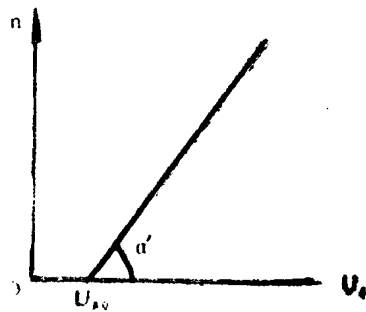


图1-1-4 伺服电动机的调节特性

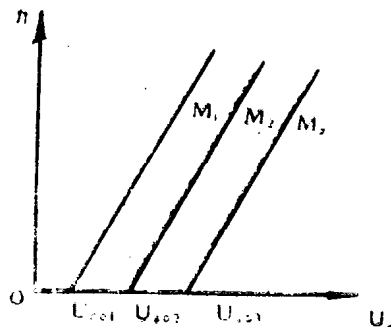


图1-1-5 调节特性曲线族

向器的滑动接触造成运行的不可靠。②低速时运行不够稳定。这是因为低速时电刷和换向器的电压降和摩擦转矩不够稳定，电枢有齿槽使转矩不均匀等引起的。正是由于这些缺点，限制了直流伺服电动机在自动控制系统中更广泛的应用。

二、交流伺服电动机

1. 交流伺服电动机的结构特点：

交流伺服电动机即两相异步电动机，它有两种基本结构形式，一种是鼠笼转子伺服电动机，一种是杯形转子伺服电动机。

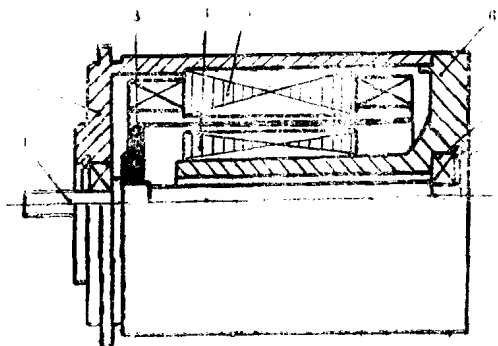


图1-1-6 鼠笼转子伺服电动机

鼠笼转子伺服电动机的结构和一般三相异步电动机相似，如图 1-1-6 所示。它由定子和转子两大部份组成。图中 1 为转轴，2 为外壳，3 为定子铁心，4 为转子，5 为端盖，6 为卡环，7 为轴承，8 为定子绕组。定子和三相异步电动机基本相同，在定子铁心中放置两相绕组，它们的匝数相等，在空间互成 90° 电角度，如图 1-1-7 所示。其中 J_1, J_2 是励磁绕组， K_1, K_2 是控制绕组。尺寸小的电机采用图示的集中绕组，尺寸大的电机采用短矩分布绕组。转子为鼠笼形，其结构和三相异步电动机基本相同，在转子槽中用压铸方法铸入铝合金导条。

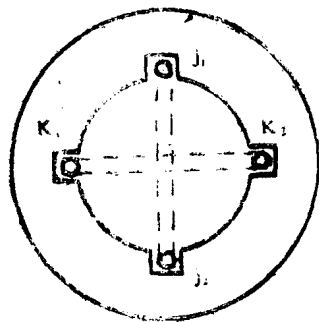


图1-1-7 两相绕组

鼠笼转子伺服电动机，由于定子和转子表面都有齿和槽，因而使气隙中磁通的分布不是有规则的正弦波，这会使电机在运转过程中产生振动、噪声，特别在低速运行时，产生转速不稳和抖动现象。为了削弱这种影响，和三相异步电动机一样，通常把鼠笼转子的槽相对轴线扭转一个角度（一般扭斜一个定子齿距），如图 1-1-8 所示。为了使动作灵敏，鼠笼转子一般做得细而长，以减小转动惯量。

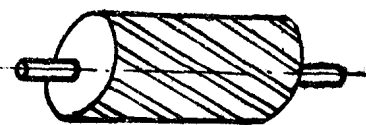


图1-1-8 鼠笼转子

杯形转子伺服电动机的结构如图 1-1-9 所示。图中 1 为转轴，2 为机壳，3 为杯形转子，4 为内定子，5 为外定子，6 为端盖，7 为轴承，8 为卡环。定子铁心分为两部分，一部

分与电机外壳固定在一起，称为外定子，其结构和鼠笼伺服电动机的定子一样，另一部分也和机壳相连，但它处于外定子内腔的中心，故称为内定子，它是由环形钢片叠成。两相定子绕组一般放在外定子槽中，但小功率伺服电动机，为了工艺方便，把两相定子绕组放在内定子上。内定子和外定子在电机中形成封闭磁路，两者之间留有较大的间隙，以便安放杯形转子。杯形转子是由非磁性材料（铝合金或铜合金）作成薄壁圆筒，壁厚一般为0.3毫米左右，它可以通过转轴在内外定子之间的气隙中自由转动。杯形转子在电机中所起的作用和鼠笼转子完全相同，因为杯形转子可以看成是非常多的鼠笼条彼此紧靠在一起而成，因而两者没有本质的区别。

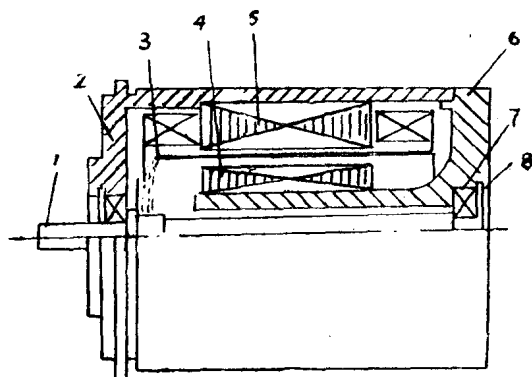


图1-1-9 杯形转子伺服电动机

杯形转子伺服电动机和鼠笼转子电动机比较，它的转子的转动惯量较小，定转子之间没有齿和槽，因而运转平稳，特别是低速时尤为明显。但它的气隙较大，所以励磁安匝多，使电机体积变大，降低了电机的利用率。另外，它的加工工艺也较复杂。因此，广泛采用的是鼠笼转子伺服电动机，只是在要求运行特别平滑的系统，尤其是要求在低速时运行平滑的系统，才采用杯形转子伺服电动机，如用于积分电路等。

2. 交流伺服电动机的基本作用原理

图1-1-10是两相交流伺服电动机的原理图。 $j_1 j_2$ 是励磁绕组，加固定励磁电压 \dot{U}_j ； $K_1 K_2$ 是控制绕组，加变动的控制电压 \dot{U}_K 。

交流伺服电动机的基本作用原理和三相异步电动机基本相同。在三相异步电动机中，如果在三相绕组中加上三相对称电压，在电机中将产生旋转磁场。旋转磁场的转速 n 不变，叫同步转速。旋转磁场的幅值也不变。这种大小不变、速度也不变的旋转磁场叫圆旋转磁场。在两相伺服电动机中，如果两相绕组对称，在两相绕组中加上两相对称电压（ U 和 U_A 大小相等、相位相差 90° ）如图1-1-11所示，则在电机中也将产生圆旋转磁场，磁场大小不变，以同步速 n 旋转。旋转磁场切割转子导体，则在鼠笼条中产生感应电势，由于鼠笼条自行短路，因而其中有感应电流。鼠笼条中的电流和旋转磁场相互作用，使转子产生转矩，转子就沿着旋转磁场的方向旋转起来，但转子的转速 n' 一定要低于旋转磁场的同步转速 n 。这个过程和三相异步电动机是完全相同的。但是，由于两相伺服电动机功率较小，摩擦转矩和阻尼转矩的影响较三相异步电动机要大，所以转子的转速 n' 较三相电动机要低，一般只有同步转速的5/6左右。

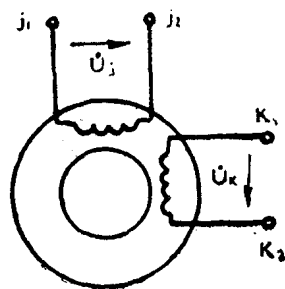


图1-1-10 两相伺服电动机原理



图1-1-11 两相对称电压

① 椭圆旋转磁场

上面谈到，当两相电动机的绕组加上两相对称电压时，在电机中产生圆旋转磁场。但是，为了对两相伺服电动机进行控制，控制电压 U_K 是经常变化的。控制方法一般有三种：一是幅值控制：改变 U_K 的大小，但 U_K 和 U_j 的相位差不变，保持 90° 。二是相位控制：改变 U_K 的相位，但保持 U_K 和 U_j 的大小相等。三是幅相控制： U_K 的大小和相位都同时变化。可以看出，不管那种控制方法，控制电压 U_K 和励磁电压 U_j 经常是不对称的。不对称的电压将在电机中产生什么样的磁场呢？

我们分析幅值控制的情况，即 U_K 和 U_j 相位相差 90° ，但大小不等，如图1-1-12(a)所示。若以 $\alpha = \frac{U_K}{U_j}$ 叫信号系数，则 $\dot{U}_K = -j\alpha\dot{U}_j$ 。两相电机一般运行在 $0 < \alpha < 1$ 的范围内。当

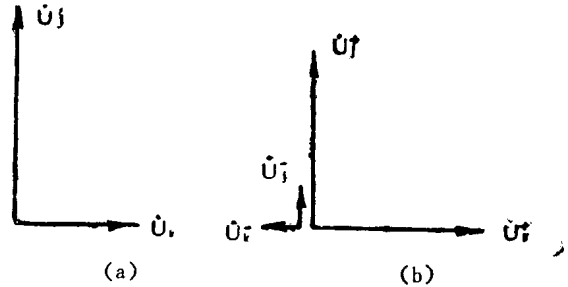


图1-1-12 不对称两相电压分解为两个对称两相电压

$\alpha = 1$ 时， $\dot{U}_K = -j\dot{U}_j$ ，是对称两相电压，电机中建立圆旋转磁场。当 $\alpha = 0$ 时， $\dot{U}_K = 0$ ，相当于单相电机，电机中建立脉动磁场。当 $0 < \alpha < 1$ 时，是不对称两相电压，是两相电机的一般运行状况。根据对称分量法，一个不对称的两相系统，可以分解为两个对称系统，但相序相反，如图1-1-12(b)所示。由图可知，分解的原则是

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_K^+ &= -j\dot{U}_j^+ \\ \dot{U}_K^- &= j\dot{U}_j^- \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

且

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_K &= \dot{U}_K^+ + \dot{U}_K^- \\ \dot{U}_j &= \dot{U}_j^+ + \dot{U}_j^- = j\dot{U}_K^+ - j\dot{U}_K^- \end{aligned} \right\} \quad (1-1-6)$$

因而

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_K^+ &= \frac{\dot{U}_K - j\dot{U}_j}{2} = -j\dot{U}_j \frac{1+\alpha}{2} \\ \dot{U}_K^- &= \frac{\dot{U}_K + j\dot{U}_j}{2} = j\dot{U}_j \frac{1-\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-7)$$

正序电压 \dot{U}_K^+ 和 \dot{U}_j^+ 在定子绕组中产生正序电流，由于它是一个对称系统，因而在电机中建立一个圆旋转磁场。负序电压 \dot{U}_K^- 和 \dot{U}_j^- 在定子绕组中产生负序电流，由于它也是一个对称系统，因而在电机中也建立一个圆旋转磁场。由于正序电压和负序电压大小不等，相序相反，因而两个旋转磁场的大小不相等，但以同步速 n_s 向相反方向旋转，而电机中实际存在的磁场，就是这两个磁场的叠加。下面我们说明叠加后的合成磁场是个椭圆磁场。

图1-1-13中 ϕ^+ 表示正序旋转磁场， ϕ^- 表示负序旋转磁场，它们以同步速 n_s 向相反方向旋转，在电机空间形成合成磁场 ϕ ，则 $\dot{\phi} = \dot{\phi}^+ + \dot{\phi}^-$ 。若以 x 表示 ϕ 的横坐标， y 表示 ϕ 的纵坐标，则

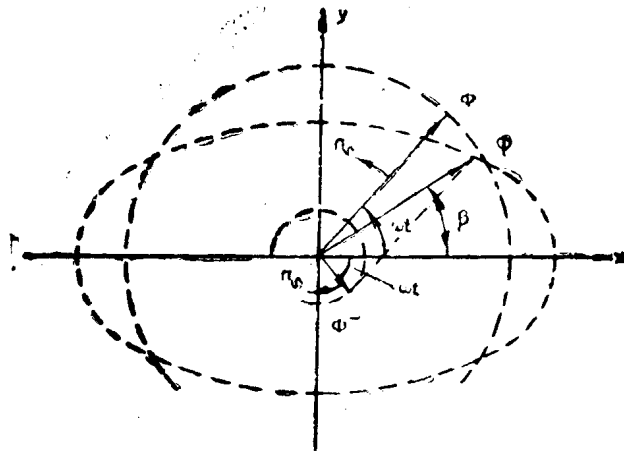


图1-1-13 椭圆磁场

$$x = \Phi^+ \cos \omega t + \Phi^- \cos \omega t = (\Phi^+ + \Phi^-) \cos \omega t$$

$$y = \Phi^+ \sin \omega t - \Phi^- \sin \omega t = (\Phi^+ - \Phi^-) \sin \omega t$$

两式平方相加，得

$$\frac{x^2}{(\Phi^+ + \Phi^-)^2} + \frac{y^2}{(\Phi^+ - \Phi^-)^2} = 1 \quad (1-1-8)$$

上式是一个椭圆方程，说明 Φ 在空间的运动轨迹是个椭圆，所以叫椭圆磁场。

由图可知，椭圆磁场的大小：

$$\Phi = \sqrt{(\Phi^+)^2 + (\Phi^-)^2 + 2\Phi^+\Phi^-\cos 2\omega t} \quad (1-1-9)$$

椭圆磁场的旋转速度：由图可得，

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y}{x} = \frac{\Phi^+ - \Phi^-}{\Phi^+ + \Phi^-} \operatorname{tg} \omega t, \text{ 即 } \beta = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\Phi^+ - \Phi^-}{\Phi^+ + \Phi^-} \operatorname{tg} \omega t \right],$$

旋转速度 $n = \frac{d\beta}{dt}$ ，则

$$n = \omega \frac{(\Phi^+)^2 - (\Phi^-)^2}{\Phi^2} \quad (1-1-10)$$

由于 Φ 的大小是随着时间而变化的，所以椭圆磁场在空间的旋转速度是变化的，而不像圆旋转磁场那样是个常数。

②两相伺服电动机的基本作用原理

若 $\alpha = 0$ ，即 $U_K = 0$ 时，两相电机变成一个单相电机，其分析方法和单相电动机相同。此时，电动机中 U_j 建立一个脉动磁场。我们知道，一个脉动磁场可以分解为两个大小相等而转向相反的旋转磁场，如图 1-1-14 所示。这两个旋转磁场要分别使电机的转子产生转矩，当转子静止（即 $n = 0$ ）时，两个

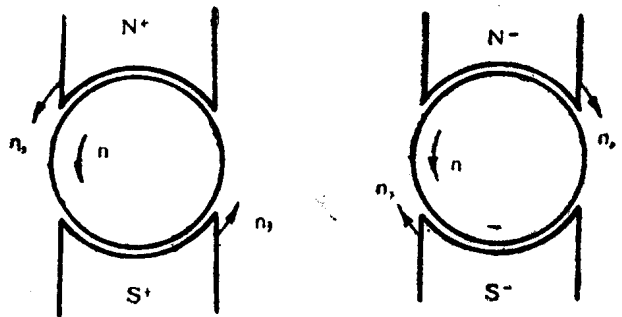


图1-1-14 脉动磁场分解为两个旋转磁场

磁场对转子的转差率 $S = \frac{n_s - n}{n_s}$ 都等于 1，因此产生两个大小相等方向相反的转矩，合成转矩为零，电机不动，即单相电动机没有起动转矩，不能自行起动。当转子以速度 n 转动后，和转子转向相同的正向旋转磁场其转差率为 $S_1 = \frac{n_s - n}{n_s}$ ；和转子转向相反的反向旋转磁场

其转差率为 $S_2 = \frac{n_s + n}{n_s} = 2 - S_1$ 。正向旋转磁场产生正向旋转力矩 M^+ ，反向旋转磁场产生反向制动转矩 M^- ，其合成转矩为 $M = M^+ + M^-$ 。各个转矩与转差率之间的关系表示在图1-1-15中，由于两个旋转磁场的大小相等，所以 M^+ 和 M^- 是对称的。当 $S = 1$ 时， $M = 0$ ，说明单相电动机起动转矩为零，不能自行起动。当 $S \neq 1$ 时， $M \neq 0$ ，说明单相电动机不论向那个方向加一外力使其转动，电动机就可以继续转动。

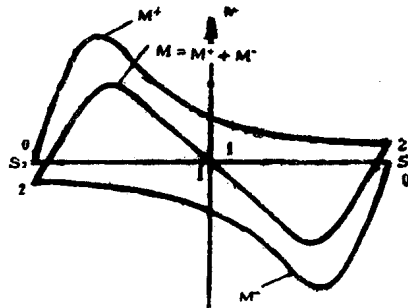


图1-1-15 单相电动机的转矩特性

若 $\alpha \neq 0$ ，即 $U_K \neq 0$ 时，在两相不平衡电压 U 和 U_K 的作用下，电机中建立椭圆磁场，一个椭圆磁场可以分解为两个转向相反、转速相同、大小不等的圆旋转磁场。和转子转向相同的旋转磁场叫正向旋转磁场，和转子转向相反的旋转磁场叫反向旋转磁场。由于正向旋转磁场总是大于反向旋转磁场，所以正向旋转磁场在电机中产生的正向转矩 M^+ 大于反向旋转磁场在电机中产生的反向转矩 M^- ，即 $M^+ > M^-$ 。合成转矩 $M = M^+ + M^-$ 的转矩曲线如图1-1-16所示，其形状和单相电动机相似，但由于 $M^+ > M^-$ ，所以不对称。当 $S = 1$ 时， $M > 0$ ，说明电机具有起动转矩。

一般驱动用的电动机，总是运行在 $S_1 = 0 \sim S_m$ 的范围内，当 $S_1 > S_m$ 时，电机运行不稳定。但对两相伺服电动机，则要求在较大的速度范围内要稳定运行。另外，为了使动作敏捷，也要求起动转矩要大。从图1-1-16的转矩曲线看到，起动转矩较小，而且稳定运行的速度范围也较小，在低速时运行不稳定。另外，在运行中控制电压去掉后，电机变为单相，从单相转矩曲线看到，电机仍受到转矩的作用继续旋转，这种现象叫自转。这些都不能满足对伺服电动机的要求。

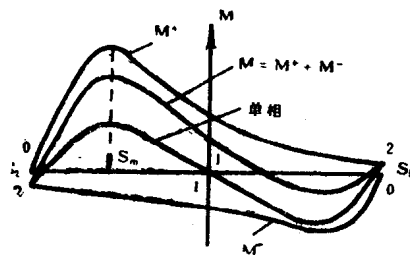


图1-1-16 两相电动机转矩曲线

为了满足对伺服电动机的要求，采取的措施是加大转子绕组的电阻，鼠笼条采用高电阻率的金属做成。转子绕组电阻加大后，转矩特性曲线的形状发生变化， S_m 加大，如图1-1-17所示，从转矩特性曲线可以看出，在

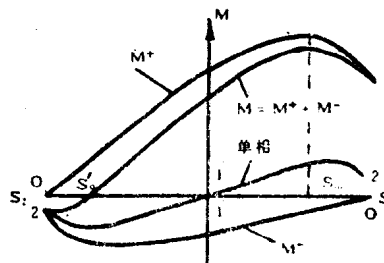


图1-1-17 伺服电动机的转矩特性

$S' < S < 1$ 的整个范围内, 电机都能稳定运行。在单相运行时, 转矩是负值, 即为制动转矩, 这就可以使电机很快停下来, 不会产生自转。当 $S = 1$ 时, 起动转矩较大, 因而动作敏捷。总之, 增加转子电阻以后, 可以满足对伺服电动机的要求。

3. 交流伺服电动机的特性

(1) 机械特性

当伺服电动机的励磁电压为额定值, $\alpha = \text{常数}$ 时, 转矩和转速之间的关系, 即 $M = f(n)$, 称为机械特性。

根据图1-1-17, 把坐标作适当变换, 即可得到电动机的机械特性, 如图1-1-18所示。图1-1-19画出了不同信号系数时机械特性曲线族。当 $\alpha = 1$ 时, 为圆旋转磁场, 转矩最大, 所以机械特性最高。 α 越小, 机械特性越低, 因为 α 越小, 即 U_K 小, 反向旋转磁场大, M^- 也大, 因而电机的合成转矩小。

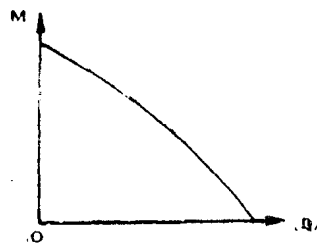


图1-1-18 机械特性

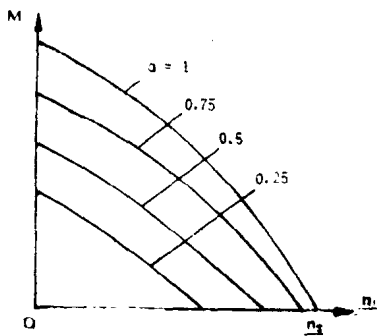


图1-1-19 机械特性曲线族

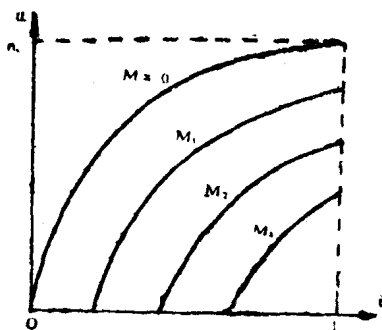


图1-1-20 调节特性曲线族

(2) 调节特性

当励磁电压为额定值, $M = \text{常数}$ 时, 电动机的转速随控制电压的改变而变化的关系, 即 $n = f(U_K)$, 称为调节特性。

调节特性可以由机械特性求得。如果在图1-1-19上作平行于横轴的转矩线, 它与机械特性曲线族相交许多点, 将这些交点所对应的转速及信号系数画成关系曲线, 就是该输出转矩下的调节特性。不同的转矩线, 对应不同转矩下的调节特性, 如图1-1-20所示。

(3) 堵转特性

当励磁电压为额定值, $n = 0$ 的转矩叫堵转转矩 M_d 。堵转转矩和信号系数的关系, 即 $M_d = f(\alpha)$ 叫堵转特性。

堵转特性也可以由机械特性直接求得, 它一般接近于直线, 如图1-1-21。

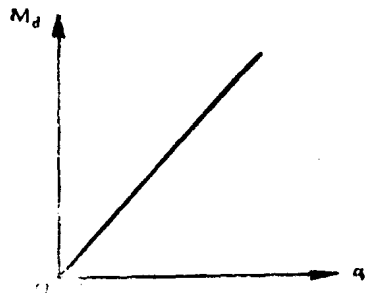


图1-1-21 堵转特性

4. 交流伺服电动机的相位控制和电容控制

(1) 相位控制

我们在前面讨论交流伺服电动机的特性时，认为 U_1 和 U_K 在相位上相差 90° ，改变 U_K 的大小，就可以改变旋转磁场的椭圆程度，这就是“幅值控制”。但是，如果 $\alpha = 1$ ， U_j 和 U_K 的相位差不是 90° ，这时电机中仍是椭圆磁场。

因此，当 $\alpha = 1$ 时，改变 U 和 U_K 的相位差 β ，也可以对电机实行控制，这就是“相位控制”。

图1-1-22是相位控制时的机械特性。从图中可以看出， β 角在 90° 附近($60^\circ \sim 120^\circ$ 之间)的机械特性和 $\beta = 90^\circ$ 时的机械特性相差不大。

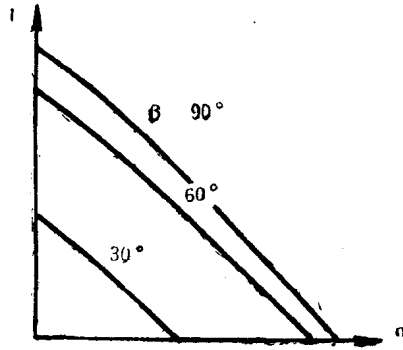


图1-1-22 相位控制时的机械特性

(2) 电容控制

在某些控制系统工作的地方，只有单相电源，这时常用电容器来移相，如图1-1-23所示。

选择移相电容 C 的数值时，应使它的容抗大于励磁绕组的感抗，这样整个励磁回路的阻抗就变成容性的，即励磁回路电流 \dot{I}_j 的相位将超前于电源电压 \dot{U}_1 ，如图1-1-24所示。励磁绕组的端电压 $\dot{U}_j = \dot{I}_j Z_j = \dot{I}_j |Z_j|$ ，即 \dot{U}_j 领先 \dot{I}_j 一个相角 φ_j ($|Z_j|$ 和 φ_j 是励磁绕组的阻抗和阻抗角)，电容两端的电压 $\dot{U}_C = \frac{\dot{I}_j}{j\omega C}$ ，即 \dot{U}_C 落后于 \dot{I}_j 90° 角。因此，在确定的 Z_j 下，改变电

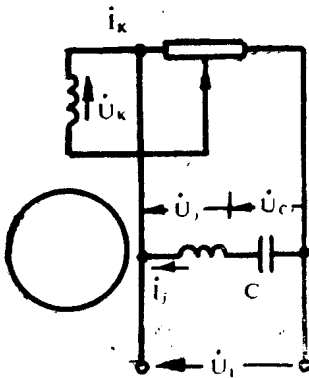


图1-1-23 电容伺服电动机

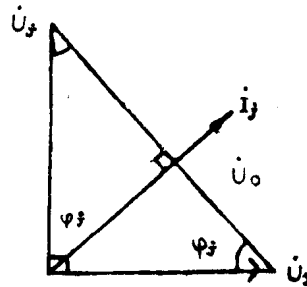


图1-1-24 电容伺服电动机相量图

容 C ，就可使 \dot{U}_j 按我们所要求的数值领先 \dot{U}_1 。图1-1-24表示 \dot{U}_j 超前于 \dot{U}_1 90° 角，也就是 \dot{U}_K 和 \dot{U}_j 的相位差 90° ，由图可以看出 $U_j/U_C = |Z_j| \omega C = \sin \varphi_j$ 。所以，为了保证 U_j 领先 U_1 90° 角所需要的电容 C 为：

$$C = \frac{\sin \varphi_j}{\omega |Z_j|} = \frac{\sin \varphi_j}{2\pi f |Z_j|} \quad (1-1-11)$$

相应的， U_j 和 U_C 与 U_1 也有一定的关系：

$$U_j = U_1 \tan \varphi_j \quad (1-1-12)$$

$$U_C = U_i / \cos \varphi_j \quad (1-1-13)$$

通常 $\tan \varphi_j$ 、尤其是 $1/\cos \varphi_j$ 都大于 1，所以 U_j 、尤其是 U_C 会比 U_i 高。

必须指出，阻抗 $|Z_j|$ 和阻抗角 φ_j 都是随着转速变化的，因为当改变负载转矩使电机转速变化时，电流 I_j 的大小和相位也会变化，因此 $|Z_j|$ 和 φ_j 也会变化。这样，根据某一转速（通常是在 $n=0$ 时）测得的 $|Z_j|$ 和 φ_j ，用式（1-1-11）确定的电容值，只能保证在该转速下移相 90° ，在其它转速下就不是 90° 了，不过这个变化一般只有 10 多度，对 $\sin \beta$ 影响不大。

图 1-1-25 是电容伺服电动机的机械特性，和幅值控制时比较，特性的非线性更为严重。这是因为，当转速升高时，励磁绕组两端的电压 U 会增大，因而磁场的椭圆度也随之增大，反向旋转磁场的影响在高速段比低速段更明显，所以在低速段随着转速增加转矩下降慢，在高速段转矩下降快，从而使机械特性在低速段出现鼓包现象，这对控制系统的工作是很不利的。

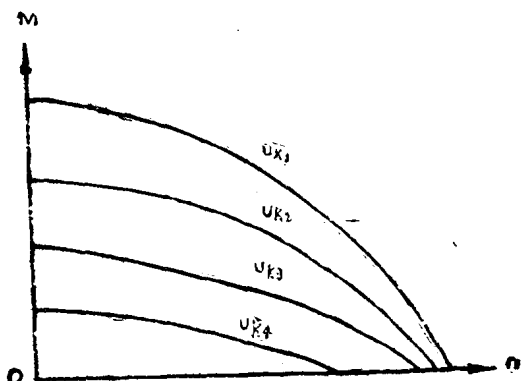


图1-1-25 电容伺服电动机机械特性

电容伺服电动机虽然特性较差，但其移相方法比较简单，所以在只有单相电源的地方还是得到广泛的应用。

5. 伺服电动机的应用

伺服电动机在自动控制系统中用作执行元件。当输入控制电压后，电动机按照控制电压的要求驱动工作机械。它通常作为随动系统、遥控和遥测系统及各种增量运动系统的主要传动元件。增量运动系统是一种既可以作间断阶跃，又可以作高速连续运转的数值控制系统，如计算机打印机的纸带驱动系统和磁盘存储器的磁头驱动机构等。

在伺服系统中，按被控对象的不同，通常采用两种控制方式：①位置控制方式，是把电动机的转角位置作为被控对象；②速度控制方式，是把电动机的速度作为被控对象。

图 1-0-1 的火炮控制系统是典型的位置控制系统。它保证了火炮的转角和手轮的转角相等，即实现了位置传递，所以叫位置伺服系统。图 1-1-26 是速度伺服系统和积分电路的示意图。图中 1 为检差器，2 为放大器，3 为伺服电动机，4 为测速发电机，5 为电位器。伺服电动机的转速 n 由输入信号电压 U_λ 控制，当 U_λ 一定时， n 也一定，实现了速度控制。电位器 5 的输出电压 U 是信号电压 U_λ 的积分，构成积分电路。

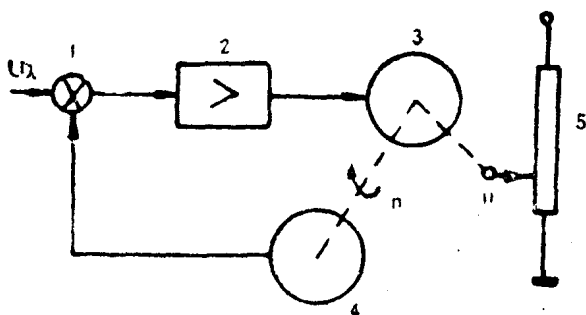


图1-1-26 速度伺服系统和积分电路示意图

§ 1—2 测速发电机

在自动控制系统中，经常需要把机械转速变成相应的电气信号，测速发电机就是完成这种任务的一种电磁元件。它的输出电压和转速成正比，如图1-2-1所示。

对测速发电机的基本要求是：（1）线性度好。即输出电压和转速要成正比。误差要小，误差包括幅值误差和相位误差；（2）输出斜率大。即单位转速（千转/分）产生的输出电压（伏）要大。（3）剩余电压小。即要求 $n = 0$ 时，没有输出电压。

在控制系统中，测速机用作解算元件和阻尼元件。当用作解算元件时，主要要求线性度好和剩余电压小，以提高系统精度。当用作阻尼元件时，主要要求输出斜率大，以提高系统灵敏度。

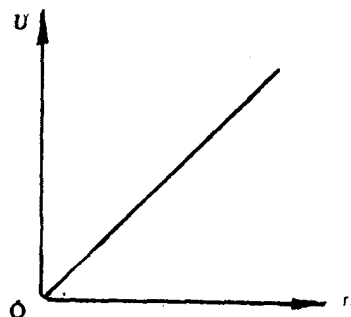


图1-2-1 测速机的输出特性

按电流种类分，测速机可分为直流测速机和交流测速机两大类。

一、直流测速发电机

直流测速发电机是一种小型直流发电机，按励磁方式分为电磁式（他励）和永磁式。他励式的结构和直流伺服电动机相同；永磁式的定子是用凸极的永久磁铁做成，永久磁铁是用矫顽力较高的磁钢制造。

直流测速机的原理和直流发电机相同（图1-2-2）。直流发电机电枢绕组中的感应电势为

$$E_a = K_e n \phi \quad (1-2-1)$$

式中 K_e 是由电机参数决定的常数， ϕ 是每极磁通， n 是转速。

在空载时，若磁通 ϕ 不变，电机的输出电压等于感应电势。接上负载 R_L 后，电枢电流 $I_a \neq 0$ ，电机的输出电压为

$$U_a = E_a - I_a R_a \quad (1-2-2)$$

式中 R_a 是电枢的总电阻，包括电枢绕组电阻和电刷换向器之间的接触电阻。

从负载端看：

$$U_a = I_a R_L \quad (1-2-3)$$

由式（1-2-1），（1-2-2）和（1-2-3）可得：

$$U_a = E_a - \frac{U_a}{R_L} R_a$$